

DOI: 10.26896/1028-6861-2018-84-5-55-59

УДК (UDC) 620.17:531.754:621.315

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ЛИТОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТОКОПРОВОДА¹

© Егор Владимирович Москвичев, Никита Викторович Еремин

ООО «Диджитал Майнд Девелопмент», г. Красноярск, Россия; Институт вычислительных технологий СО РАН, Красноярский филиал, г. Красноярск, Россия; e-mail: jugr@icm.krasn.ru

Статья поступила 21 ноября 2017 г.

В рамках научно-исследовательских работ по обеспечению прочности и безопасности токопроводов с литой изоляцией проведены экспериментальные исследования физико-механических свойств материала литой изоляции «заводского и «монтажного» типов. Изоляция «заводского» типа применяется при производстве секций трассы токопровода, а «монтажного» типа — для изоляции стыков секций при проведении монтажа трассы. Проведенный анализ эксплуатационных факторов позволил обосновать физические и механические свойства материала литой изоляции, наиболее влияющие на прочность токопровода. Исследования включали определение упругих характеристик и предела прочности методом статических механических испытаний плоских образцов на растяжение и трехточечный изгиб. Испытания проводили при пониженной, нулевой и повышенной температурах в соответствии с режимами эксплуатации токопровода. На образцах в виде стержней определяли значения коэффициента линейного теплового расширения материала для двух температурных диапазонов. Методом обмера и взвешивания находили значения плотности. Эксперименты проводили по методикам, представленным в государственных стандартах. По результатам экспериментов установлено влияние температуры на модуль упругости и предел прочности материала изоляции при изгибе. При этом предел прочности изоляции монтажного типа на 7–30 % выше, чем изоляции заводского типа. Это объясняется более мелкой и однородной структурой монтажной изоляции. В целом механические свойства, определенные в результате экспериментов, оказались значительно ниже декларируемых производителем токопровода. Это может приводить к переоценке прочности литой изоляции при контроле безопасности токопроводов с учетом декларируемых значений механических свойств. Полученные результаты предложено учитывать при проведении расчетов напряженно-деформированного состояния токопроводов с литой изоляцией при различных температурах эксплуатации.

Ключевые слова: токопровод; литая изоляция; механические свойства; испытания.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF CAST-RESIN INSULATION MATERIAL OF BUSBAR SYSTEM

© Egor V. Moskvichev, Nikita V. Eremin

“Digital Mind Development” Ltd., Krasnoyarsk, Russia; Institute of Computational Technologies SB RAS, Krasnoyarsk branch, Krasnoyarsk, Russia; e-mail: jugr@icm.krasn.ru

Submitted November 21, 2017.

Experimental studies of the physical and mechanical properties of “factory” and “field” types of cast-resin insulation material are carried out in the framework of scientific research regarding the reliability and safety assurance of cast-resin insulated busbar systems. Insulation of the “factory” type (FT) is used in manufacture of sections of the busbar system, whereas insulation of the “mounting” type (MT) is used to isolate the joints of sections during their installation. Analysis of the operational factors revealed a set of the physical and mechanical properties of cast-resin insulation material which affects most strongly the strength of the busbar system. The studies included determination of the elastic characteristics and ultimate strength by the method of static mechanical tests of flat specimens for tension and three point bending. The tests were performed at low, zero and high temperatures

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности в рамках научного проекта № 16-48-243022.

according to operation modes of the busbar system. The coefficients of linear thermal expansion of the material for two temperature ranges were determined using rod specimens. The density of the material was measured by measuring size and weight of the specimens. All experiments were carried out using the methods listed in state standards. The results of the experiments showed a distinct effect of temperature on the Young's modulus and the ultimate strength of the insulation material in bending tests. The ultimate strength of the MT insulation is 7 – 30% higher compared to FT insulation due to the fine and more uniform structure of MT insulation. As a whole, the mechanical properties determined in the experiments are significantly lower than the mechanical properties declared by the manufacturer. This can lead to reassessment of the strength of cast-resin insulation during safety control of busbar systems considering the declared values of the mechanical properties. In this regard, the obtained results should to be taken into account in calculation of the stress-strain state of the busbar systems with cast-resin insulation at different operation temperatures.

Keywords: busbar system; cast-resin insulation; mechanical properties; testing.

Накопленный опыт эксплуатации токопроводов с литой изоляцией в условиях Сибири показал возможность возникновения аварийных ситуаций с образованием электрического пробоя и поражением людей [1]. При анализе причин аварии на одном из гидроэнергетических объектов были выявлены трещины в изоляции различных элементов трассы токопровода. Результаты научно-технической экспертизы показали, что разрушение изоляции возникает вследствие действия не регламентируемых механических нагрузок, обусловленных дефектами монтажа, недостаточным количеством компенсаторов температурных расширений на трассе токопровода и переменной температурой эксплуатации.

Данные результаты послужили основой для проведения работ по обеспечению прочности и безопасности токопроводов с литой изоляцией, работающих в регионах Сибири. В рамках этих работ был сформирован комплекс расчетно-экспериментальных исследований, которые заключались в анализе прочности, включающем конечно-элементное моделирование деформирования токопровода на основе экспериментальных данных о свойствах материала литой изоляции [2]. Таким образом, основная задача данной работы — определение физико-механических свойств материала изоляции с учетом диапазона эксплуатационных температур и факторов, приводящих к разрушению.

Анализ эксплуатационных факторов и разрушений, представленный в работе [3], показал, что на элементы токопровода воздействуют:

температуры в диапазоне от -60 до $+40$ °С, приводящие к температурным расширениям;

силовые нагрузки, возникающие как реакции на температурные деформации;

весовые нагрузки на опорные элементы токопровода.

С учетом данных воздействий для исследования прочности токопровода необходимо иметь значения упругих и прочностных свойств (модуля упругости, коэффициента Пуассона, предела

прочности) при различных температурах; коэффициента линейного теплового расширения; плотности.

При выборе методов испытаний конструкционного материала важно учесть особенности его структуры и обеспечить соответствие условий испытаний характеру нагружения в элементе конструкции. Рассматриваемый материал изоляции токопровода представляет собой эпоксидный компаунд марки V.I.M. (Beto Iso Mix), разработанный бельгийской компанией Eta-com и применяемый в токопроводах серии Betobar-r, которые соответствуют стандарту IEC 62271 (1 и 201). Получаемый методом литья и насыщенный особыми частицами инертных материалов компаунд имеет мелкозернистую структуру. Наличие эпоксидного связующего позволяет отнести его к классу не термореактивных пластмасс, а мелкозернистый наполнитель дает основание рассматривать компаунд как композитный материал. Таким образом, при анализе отечественных нормативных методов испытаний были выбраны следующие стандарты в качестве основы для исследования физико-механических свойств материала изоляции:

ГОСТ 25.604–82. «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на изгиб при нормальной, повышенной и пониженной температурах»;

ГОСТ 25.601–80. «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах»;

ГОСТ 15173–70. «Пластмассы. Метод определения среднего коэффициента линейного теплового расширения»;

ГОСТ 15139–69. «Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы)».



Рис. 1. Заготовки образцов заводского (а) и монтажного (б) материалов изоляции

Экспериментальные исследования проводили на материале изоляции «заводского» типа, применяемом при производстве готовых секций токопровода, и «монтажного» типа, используемом для изоляции стыков секций и произведенном на месте монтажа (рис. 1). Материал изоляции имеет ярко выраженную зернистую структуру, крупную для заводского типа и более мелкую и однородную — для монтажного. При этом монтажный материал изоляции содержит многочисленные поры сферической формы диаметром от 1 до 5 мм, которые предположительно являются воздушными пузырями, образовавшимися при заливке компаунда во время монтажа токопровода.

Заготовки образцов в необходимом для проведения испытаний количестве вырезали из фрагментов токопровода с помощью угловой шлифовальной машины, оснащенной диском с алмазным напылением. До требуемых размеров образцы доводили на камнерезном и гидроабразивном станках.

Механические свойства определяли на прямоугольных образцах для испытания на трехточечный изгиб (рис. 2, а) и образцах с вырезами для испытания на растяжение (рис. 2, б). Толщина образцов составляла 10 мм. Для каждого вида и температуры испытаний изготовлено по пять образцов заводского и монтажного материала изоляции, всего — 40 образцов.

Для оценки коэффициента линейного теплового расширения и измерения плотности изготавливали образцы в виде стержней квадратного поперечного сечения (рис. 2, в). Было изготовлено четыре набора по пять образцов для двух типов материала изоляции и двух интервалов температур, общее количество — 20 образцов.

Испытания на изгиб проводили согласно ГОСТ 25.604–82 при температурах $-60,0$ и $+40$ °С на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z100. Испытательная машина

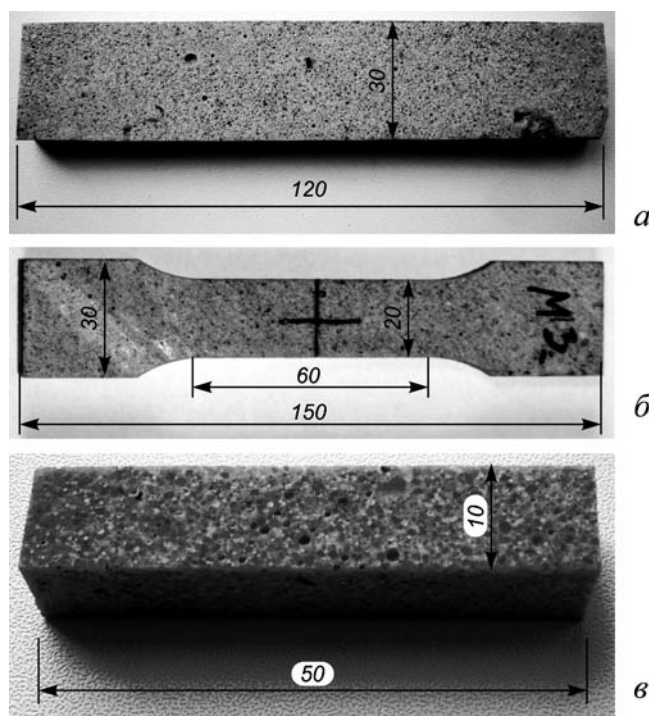


Рис. 2. Образцы для испытаний на трехточечный изгиб (а), растяжение (б) и определения коэффициента линейного теплового растяжения (в)

была оснащена термокриокамерой и приспособлением для трехточечного изгиба. Расстояние между опорами приспособления составляло 100 мм, диаметр опор и нагружающего пуансона — 10 мм. Перед испытаниями образцы выдерживали в термокриокамере до полного прогрева или охлаждения не менее 120 мин. Температуру образцов контролировали с помощью пирометра и термопары. Образцы нагружали со скоростью 1 мм/мин. В процессе испытаний фиксировали диаграмму нагрузка — прогиб (рис. 3, а), по результатам обработки которой определяли модуль упругости и предел прочности при изгибе.

Испытания на растяжение проводили согласно ГОСТ 25.601–80 при комнатной температуре $+23$ °С на универсальной испытательной машине Tinius Olsen 100ST, оснащенной клиновидными захватами и видеоэкстензометром. Образцы нагружали со скоростью 3 мм/мин. В процессе испытаний фиксировали напряжение, продольную и поперечную деформацию (рис. 3, б). По результатам испытаний определяли модуль упругости, коэффициент Пуассона и предел прочности при растяжении.

Обработку результатов испытаний на изгиб и растяжение проводили согласно соответствующим стандартам. Полученные средние значения механических характеристик при различных температурах представлены в табл. 1.

Таблица 1. Значения характеристик механических свойства материала литой изоляции

Характеристика	Температура, °С	Материал изоляции	
		заводской	монтажный
Модуль упругости при изгибе $E^н$, ГПа	-60	13,37	13,53
	0	12,04	11,75
	+40	10,87	10,18
Предел прочности при изгибе $\sigma^н$, МПа	-60	36,42	47,36
	0	31,87	35,94
	+40	30,46	32,47
Модуль упругости при растяжении E , ГПа	+23	14,39	13,98
Предел прочности при растяжении σ , МПа	+23	10,79	13,53
Коэффициент Пуассона при растяжении ν	+23	0,24	0,27

Таблица 2. Значения коэффициента линейного теплового расширения материала изоляции, °С⁻¹

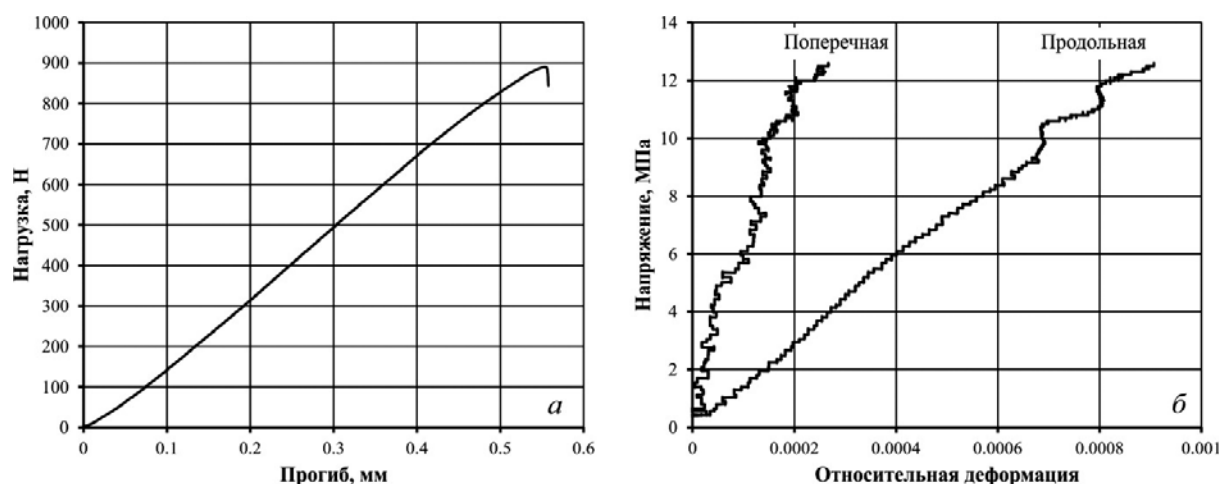
Материал изоляции	Температурный интервал, °С	
	От +23 до -60	От +23 до +40
Заводской	$20,26 \cdot 10^{-6}$	$16,25 \cdot 10^{-6}$
Монтажный	$19,59 \cdot 10^{-6}$	$20,10 \cdot 10^{-6}$

Для определения коэффициента линейного теплового расширения образцы в виде стержней испытывали согласно ГОСТ 15173–70 на универсальной испытательной машине Zwick/Roell Z100 в термокриокамере при стационарном режиме. В процессе испытаний образец термостатировали и посредством контактного экстензометра фиксировали изменение длины. Испытания проводили в двух температурных интервалах — от +23 до -60 °С и от +23 до +40 °С. Температуру образцов контролировали с помощью пирометра и термопары. При обработке данных испытаний определяли средний коэффициент линейного теплового расширения α для двух ти-

пов материала изоляции и двух интервалов температур. Результаты представлены в табл. 2.

Плотность материала изоляции определяли при комнатной температуре на прямоугольных образцах методом обмера и взвешивания согласно ГОСТ 15139–69. Было исследовано 10 образцов — по пять для каждого типа материала. С помощью электронного штангенциркуля находили линейные размеры образцов, их объем вычисляли как произведение длины, ширины и высоты. Массу образцов определяли на электронных весах, результаты считали как среднее значение трех взвешиваний. Плотность материала рассчитывали как отношение массы образца к его объему. Среднее значение плотности заводского материала изоляции составило $1,8562 \text{ г/см}^3$, плотность монтажного материала изоляции — $1,8488 \text{ г/см}^3$.

По результатам экспериментов установлено значительное влияние температуры на модуль упругости и предел прочности материала изоляции при изгибе. С понижением температуры от +40 до -60 °С для заводского и монтажного мате-

**Рис. 3.** Диаграммы нагружения образцов на изгиб (а) и растяжение (б)

риала модуль упругости возрастает на 23 и 32 %, а прочность — на 19 и 46 % соответственно.

Сравнение характеристик материалов изоляции показывает, что их модуль упругости для обоих видов нагружения при различных температурах отличается незначительно — от 1 до 6 %, однако разница в пределе прочности достигает от 7 до 30 %. Причем у монтажного типа изоляции предел прочности выше, что можно объяснить более мелкой и однородной структурой материала.

По сравнению со значениями механических свойств, декларируемыми производителем токопровода [4], модуль упругости оказался ниже на 33 %, предел прочности на изгиб и растяжение — ниже на 21 % и на 35 % соответственно. Таким образом, при проведении расчетов прочности токопровода на основе данных производителя о свойствах материала изоляции возможно несоответствие расчетных напряжений и деформаций действующим в реальной конструкции.

Полученные экспериментальные значения характеристик механических свойств компаунда использованы при расчете напряженно-деформированного состояния токопровода при различных температурах эксплуатации. Для упрощения расчетных схем целесообразно заводской и монтажный материалы изоляции рассматривать как один материал с усредненными значениями характеристик, не исключая их зависимость от температуры. При этом на этапе оценки результатов по критерию прочности следует учитывать

(в зависимости от локализации максимальных напряжений в конструкции) значительную разницу в пределах прочности двух типов материала изоляции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление Кежемского районного суда Красноярского края от 10 июня 2014 г. № 5-30/2014 по делу об административном правонарушении [Электронный ресурс]. <http://sudact.ru/regular/doc/ziCqBkm8X3os> (дата обращения: 24.10.2017).
2. Москвичев Е. В., Доронин С. В. Информационное обеспечение анализа механической прочности токопроводов с литой изоляцией / Вычислительные технологии. 2017. Т. 22. № 1. С. 48 – 54.
3. Москвичев Е. В., Филиппова Ю. Ф., Еремин Н. В. Задачи исследования механической прочности и условий разрушения токопроводов с литой изоляцией / Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 1. С. 17 – 23.
4. Каталог Betobar-r RUS [Электронный ресурс]: Токопроводы с литой полимерной изоляцией. <http://www.mesch.ru/images/katalog-betobar.pdf> (дата обращения: 24.10.2017).

REFERENCES

1. Decree of the Kezhemsky District Court of the Krasnoyarsk Krai of June 10, 2014 No. 5-30/2014 on the case of an administrative violation. URL: <http://sudact.ru/regular/doc/ziCqBkm8X3os> (accessed 24.10.2017) [in Russian].
2. Moskvichev E. V., Doronin S. V. Information support of mechanical strength analysis of cast-resin insulated busbar systems / Vychisl. Tekhnol. 2017. Vol. 22. N 1. P. 48 – 54 [in Russian].
3. Moskvichev E. V., Filippova Yu. F., Eremin N. V. Research tasks of mechanical strength and fracture of cast-resin insulated busbar systems / Zh. Sib. Fed. Univ. Ser. Tekhn. Tekhnol. 2017. Vol. 10. N 1. P. 17 – 23 [in Russian].
4. Catalog Betobar-r RUS: Molded polymer insulated conductors. <http://www.mesch.ru/images/katalog-betobar.pdf> (accessed 24.10.2017).